

튜닝포크를 이용한 액체밀도의 계측

김충현*, 이용복⁺, 이성철⁺⁺

(논문접수일 2006. 7. 21, 심사완료일 2007. 1. 19)

Measurement of Liquid Density using Tuning Fork

Choong Hyun Kim*, Yong-Bok Lee⁺, Sung-Chul Lee⁺⁺

Abstract

A sensor using quartz tuning fork is presented for measuring liquid density. It consists of a PZT plate as an actuator for piezoelectric excitation and a quartz tuning fork as a sensor for resonant frequency detection. The resonant frequency is determined from the sensing voltage measured in tuning fork when the excitation frequencies of PZT actuator are swept around the resonant frequencies of tuning fork. The resonant frequency determined the liquid density. The density values of three kinds of organic solvents are measured and compared with the standard values. The experimental results are in agreement with the standard values and the maximum standard deviation is less than 9%.

Key Words : Sensor(센서), Tuning Fork(튜닝포크), Resonant frequency(공진주파수), Liquid density(액체 밀도)

1. 서론

자가구동(self-actuating)이 가능하며 신호를 스스로 계측(self-sensing)할 수 있는 튜닝포크(tuning fork)는 액체에 이터 겸용 센서로서 일반적인 캔틸레버 센서에 비하여 전자회로가 간편하며 Q-factor와 신호대 잡음비(S/N비)가 커서 진동 등 주변 환경의 영향에 의하여 분해능이 저하되지 않는 우수한 특성을 보유하고 있다⁽¹⁾.

여기에서 Q-factor는 quality factor라고도 하며 물체의

공진주파수를 f_0 , 주파수 변동량을 Δf 라고 할 때 $Q=f_0/\Delta f$ 로 정의된다.

Q-factor가 크다는 것은 물체의 주파수가 공진주파수와 일치할 때 큰 진폭으로 공진을 일으킨다는 것을 뜻하며 또한 주파수 대역이 공진주파수에서 약간만 이탈하더라도 공진현상이 급격히 줄어든다는 것을 의미한다. 계측기 특성으로서 Q-factor가 크다는 것은 공진주파수 대역에서만 민감하게 반응함으로써 측정되는 자료의 정확도가 높을 뿐만 아니라 그 진폭이 커서 출력신호를 얻기 쉽다는 것을 의미한다.

* 한국과학기술연구원 트라이볼로지연구소 (chkim@kist.re.kr)

주소: 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

+ 한국과학기술연구원 트라이볼로지연구소

++ 인하공업전문대학교 기계시스템공학부 기계과

이러한 Q-factor는 기본적으로 물체재료의 기계적인 물성, 물체의 길이와 폭, 두께 등의 제원에 의하여 결정되며 동일한 물체일지라도 주위 매체의 밀도가 바뀌면 Q-factor도 변화한다.

튜닝포크는 진공 내에서 Q-factor가 100,000 이상의 매우 높은 값을 가지도록 제작 가능하므로 정확도를 요하는 시계, PDA(personal digital assistant) 등 각종 전자기기의 시간-주파수 기준장치로서 사용되며, 가속도 및 속도, 가스 압력과 밀도, 액체 점성 측정용 센서, 원자력간 현미경(AFM)의 탐침으로도 활용할 수 있다⁽¹⁾.

이전의 연구에서는⁽²⁾ 1 μ l 용량의 유기용매에 의한 작은 질량변화에 대해서도 튜닝포크의 공진주파수가 민감하게 변화함으로써 질량계측 분해능이 매우 우수하다는 사실을 알 수 있었다.

한편, 상용 튜닝포크의 공진주파수가 32,768Hz(진공 내)인데 반하여 수정발진자 중의 하나인 quartz crystal microbalance(QCM)의 공진주파수는 수 MHz에서 수천 MHz 수준으로서 튜닝포크보다 훨씬 더 높은 Q-factor를 가지므로 나노그램(ng) 수준의 질량변화를 감지할 정도로 정확도가 매우 우수한 계측기를 만들 수 있다⁽³⁾. 그러나 QCM은 튜닝포크보다 구동전압이 높아 전력소비량이 매우 크고 제어회로가 복잡하다는 단점이 있어 작고 저렴한 액체밀도 계측기를 제작하는데 적당하지 않다.

일반적으로 말하는 액체밀도 계측기는 비중계를 가리킨다. 액체비중계는 아르키메데스의 부력원리를 이용하여 액체의 밀도를 알아낼 수 있으며 일정온도(보통 15°C)에 맞추어 밀도를 측정하도록 되어 있다. 그러나 온도에 따라 액체의 부피가 변하므로 온도조건이 바뀌면 정확하지 않다는 단점이 있다. 최근에는 액체 내에서 초음파의 전파속도, 전도율, 빛의 굴절율 등의 변화 또는 진동관을 통과하는 액체의 공진주파수를 계측하는 방식을 채용한 정확한 액체밀도 계측기가 개발됨으로써 과즙, 우유, 원유(crude oil), 산업용 화학물질, 부동액, 유리세정액 등 다양한 종류의 액체밀도를 측정할 수 있다. 이들 계측기의 정확도는 $\pm 0.01\%$ 미만의 수준까지 도달하였으나 무겁고 부피가 커서 이동이 어렵다는 단점이 있다.

따라서 구동전압이 낮으면서도 Q-factor가 상대적으로 우수한 튜닝포크를 계측용 소자로 이용한다면, 소비전력량이 적고 계측정확도가 우수한 휴대형 액체밀도 계측기를 만들어 손쉽게 사용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 튜닝포크를 액체밀도 계측기의 계측용 소자로 사용할 수 있는가 하는 타당성을 검증하기 위한 실험을 실시하고 그 결과를 설명하였다.

즉 점도가 서로 다른 세 가지 유기용매 내에서 튜닝포크의 진동특성을 고찰하고 튜닝포크의 공진주파수값으로부터 액체의 밀도를 계산한 후 유기용매 제조업체에서 제공한 표준 밀도값과 비교함으로써 튜닝포크센서의 액체밀도 계측성능을 판단하였다.

2. 이론적 배경

튜닝포크가 액체 속에서 진동을 일으키는 경우, 액체는 감쇠효과를 나타내게 된다⁽³⁻⁵⁾. 따라서 튜닝포크의 공진주파수와 Q-factor값은 진공이나 대기 중에서는와 매우 다른 변화를 보이게 된다. 이 경우 튜닝포크의 각 다리(tine)를 한쪽이 고정된 탄성보(elastic beam)라고 가정한다면 캔틸레버에 대한 이론을 적용할 수 있게 된다⁽⁴⁾.

만약 튜닝포크 다리 중 하나는 고정되어 있고 다른 하나가 진동을 일으킨다면 액체에서의 Reynolds number는 다음과 같다.

$$R_c = \frac{\rho_L \omega x^2}{\eta_L} \quad (1)$$

여기서

ρ_L : density of liquid
 $= 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ (water)}$

η_L : viscosity coefficient of liquid
 $= 1.13 \times 10^{-3} \text{ kgm}^{-1} \text{ s}^{-1}$
 @20°C (water)

ω : angular frequency
 $= 2\pi \times 30,000 \text{ Hz}$

x : characteristic length
 $= \text{thickness of tuning fork} = 300 \mu\text{m}$

Reynolds number가 100보다 훨씬 크다면 액체의 점성이 튜닝포크의 진동에 미치는 영향은 매우 작다고 할 수 있다^(6,7).

직사각형 보(beam)가 액체 속에서 진동하는 경우, 액체의 밀도와 점성을 고려하였을 때 공진주파수는 다음과 같이 계산할 수 있다⁽⁶⁾.

$$\frac{f_{vac}}{f_o} = \sqrt{1 + \frac{1}{\rho_q W} \sqrt{\frac{2\eta_L \rho_L}{2\pi f_o} + \frac{\rho_L}{\rho_q} \frac{L}{T} F \left(\frac{W}{L} \right) \frac{A^2}{B}}} \quad (2)$$

여기서

f_{vac} : resonance frequency in vacuum

f_o : resonance frequency in liquid

- ρ_q : density of quartz including the electrodes
- ρ_L : density of liquid
- L : length of the cantilever
- W : width of the cantilever
- T : thickness of the cantilever
- $F(\frac{W}{L})$: geometrical function of the aspect ratio

식 (2)에서 제곱근기호 내의 두 번째 항은 점성저항으로 인한 관성에 관한 것이며 마지막 항은 액체로부터 받는 반작용력을 나타낸다.

캔틸레버의 기본고유모드에서 $\frac{A^2}{B} = 0.613$ 이며⁽⁸⁾ $W/L > 0.1$ 이라면 $F(\frac{W}{L}) = \sqrt{W/L}$ 이 성립된다.

물과 같은 액체의 경우 식 (2)의 두 번째 항은 세 번째 항과 비교하여 매우 작은 값이므로 이를 무시하면 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_L = \frac{1}{K} \left[\left(\frac{f_{enc}}{f_o} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

여기서 K 는 튜닝포크 재질이 가지는 밀도와 크기로 결정되는 상수값으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = 0.613 \frac{1}{\rho_q} \frac{L}{W} \sqrt{\frac{L}{T}} \quad (4)$$

3. 실험

본 연구에서는 액체의 밀도를 측정하는 튜닝포크형 미소 캔틸레버 센서를 개발하기 위해 시판되는 튜닝포크를 활용하되 PZT plate를 이용하여 튜닝포크를 작동시키는 방법을 채택하였다.

이 때 튜닝포크를 시료(유기용매)에 접촉시킨 상태에서 PZT plate를 가동하게 되면 시료의 밀도 등의 영향에 의하여 튜닝포크의 진동수와 진폭이 튜닝포크 고유값으로부터 변화하게 되므로 이러한 변화를 감지하여 시료에 따른 진동 특성변화를 평가하는 실험을 하였다.

튜닝포크를 이용하여 액체의 밀도를 측정할 수 있는 센서는 Fig. 1과 같이 제작하였다.

튜닝포크는 원래 진공챔슐에 싸여 있는 상용제품으로서 공진주파수는 $32,768 \pm 0.1\text{Hz}$ 이다.

우선 구입한 튜닝포크 제품의 캡슐을 벗기어 낸 후 다리 부분에 절연용 고분자재질로서 Parylene을 $2\mu\text{m}$ 두께로 코팅처리

하였다. 이는 만약의 경우 유기용매로 유입될 수 있는 습기에 의한 단락(short circuit)현상을 방지하기 위한 것으로서 코팅 처리 후에는 공진주파수가 다소 감소하는 것을 볼 수 있었다.

이후 튜닝포크 캡슐의 금속 케이스 부분(metal shell)을 PZT plate 한 쪽 면에 납땜하여 단단히 고정하였다. 금속케이스는 구조적으로 튜닝포크로부터 분리되어 있으므로 납땜을 하여도 튜닝포크의 진동특성에는 영향을 미치지 않는다. 튜닝포크 표면(x-z 평면)은 PZT plate 표면(x-y 평면)에 수직인 상태로 고정된다.

PZT plate의 양쪽 면은 각각이 분리된 전극이며(Fig. 1에서 3과 4) 이 전극을 통하여 구동전류를 공급하고 튜닝포크로부터 발생하는 출력전압은 전극 1과 2를 통하여 측정하게 된다.

특정주파수(f)를 가지는 교류 구동전류를 PZT plate에 공급하면 PZT plate가 z축 방향(Fig. 1에서)으로 진동함으로써 PZT plate 표면에 고정된 튜닝포크를 가진하게 된다. 튜닝포크 다리는 PZT plate의 진동주파수(f)와 동일한 주파수로 z축 방향의 진동을 일으키고 튜닝포크 재질인 quartz의 압전효과에 의하여 튜닝포크 다리의 진폭에 비례하는 전압이 발생한다.

실제 계측시에는 PZT plate 구동전류의 주파수(f)를 일정한 영역 내에서 연속적으로 변화시키면서 출력전압(V)을 기록하면 구동주파수(f)와 출력전압(V) 사이의 관계를 살펴볼 수 있으며 이것을 튜닝포크의 진동스펙트럼(또는 $f-V$ 선도)이라고 한다.

이 경우 튜닝포크가 공진상태에 도달하게 되면 튜닝포크 다리의 변위가 최대가 되므로 공진주파수를 결정할 수 있다. 실험장치의 구성은 Fig. 2와 같다.

PZT plate 구동용 전류는 전극(Fig. 1에서 3, 4)를 통하여 공급되며 PC에 설치된 DAQ card로부터 제어된다. 전극 1과 2로부터 나오는 계측전압은 low-pass filter를 거치며 잡

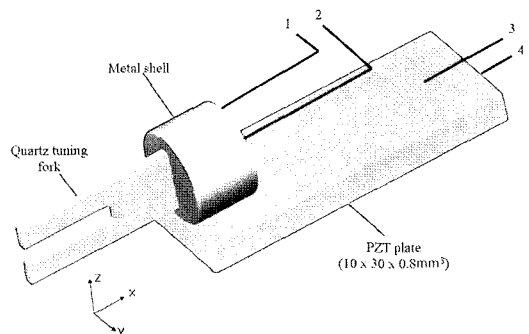


Fig. 1 Schematic view of the sensor

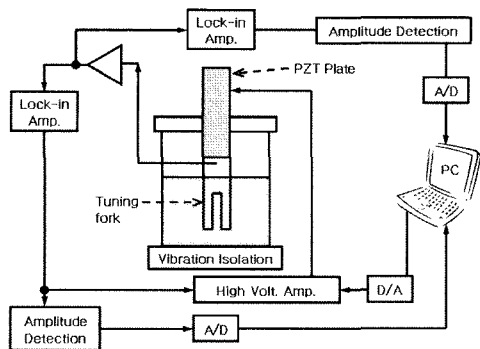


Fig. 2 Schematic view of the experimental setup

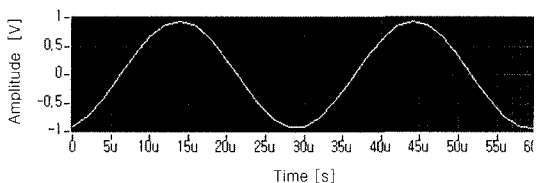


Fig. 3 Excitation voltage for the PZT plate

음신호를 제거한 후 DAQ card를 통하여 PC에서 처리된다.

PZT plate 구동용 전류는 Fig. 3에 보인 것처럼 $\pm 1.0V$ (peak-to-peak) 범위에서 조절하였으며 구동전류의 주파수는 25~35kHz 범위에서 1Hz 간격으로 연속적으로 변화시켰고 튜닝포크에서 출력되는 전압은 400개의 데이터 포인트로 나누어 분석하였다.

실험시 주위 온도는 약 26~27°C 이었고 주변으로부터의 진동영향을 배제하기 위하여 방진테이블(Newport Benchtop, USA)을 이용하였다.

튜닝포크는 약 5mm 길이로 액체 속에 담가 실험을 진행하였다.

실험에서는 액체의 밀도를 측정하기 위하여 acetone, ethanol, toluene 등의 세 가지 유기용매를 사용하였다. 이들 유기용매는 Sigma-Aldrich로부터 고순도제품을 구입하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 서로 다른 액체 속에서 튜닝포크의 진동스펙트럼을 측정하여 최대변위를 일으키는 공진주파수(f_0)를 결정하고 비교함으로써 튜닝포크를 이용한 액체밀도 측정기의 타당성을 파악하기 위한 성능실험을 실시하였다.

고진공(10^{-5} torr) 캡슐에 포장되어 있는 상용 튜닝포크는

$32,768 \pm 0.1 Hz$ 의 안정적인 공진주파수와 9,000 정도의 Q-factor 값을 가진다. 캡슐을 벗겨내고 Parylene coating 처리한 후에는 공진주파수와 Q-factor값이 각각 $32,600 \pm 5 Hz$ 과 6,000 정도로 감소하였다.

식 (3)에 각각의 주파수값과 공기의 밀도값 $\rho_L = 1.2 kg m^{-3}$ 을 대입하면 상수값 K 는 $(3.90 \pm 0.5) \times 10^{-4} m^3 kg^{-1}$ 로 결정된다.

Fig. 4는 튜닝포크의 진동스펙트럼으로서 대기 중과 액체 속에서의 진동특성을 비교하여 보여준다. 튜닝포크를 액체에 담그면 진폭이 감소하면서 공진주파수가 낮은 주파수대역으로 이동함과 동시에 Q-factor도 감소하는 데 Q-factor의 감소는 신호 대 잡음비의 급격한 감소로 이어지면서 정확한 주파수측정을 어렵게 만든다. 이러한 경우에는 PZT plate 구동전압을 크게 하여 신호 대 잡음비를 증가시킬 수 있다.

실험에 사용한 유기용매 내에서 튜닝포크의 공진주파수 대

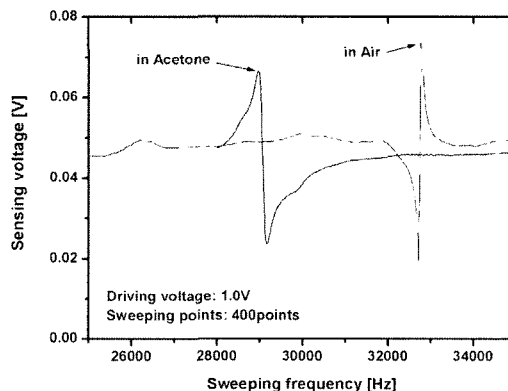


Fig. 4 The relationship between the tuning forks before and after immersion into liquid

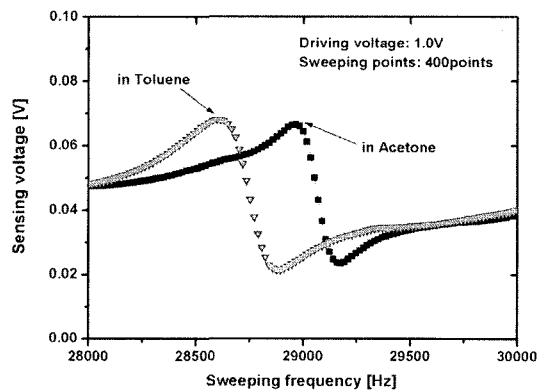


Fig. 5 Frequency response of tuning fork working in different liquids

Table 1 Results from the tuning fork

Solvents	f_{voc} [Hz]	f_o [Hz]	ρ_L [10^3kg/m^3] (experimental)	ρ_L [10^3kg/m^3] (standard, @20°C)	Error [%]
Acetone	32768±0.1	28954.3±6.0	0.720	0.791	9.0
Ethanol	32768±0.1	28852.9±14.7	0.743	0.789	5.8
Toluene	32768±0.1	28500.8±26.8	0.825	0.865	4.6

역은 28,000~29,000Hz이다. 유기용매가 바뀌면 Fig. 5와 같이 서로 다른 f-V 곡선을 나타내며 튜닝포크의 공진주파수가 액체의 종류에 따라 달라진다는 것을 보여주는 것이다.

계측한 주파수값을 식 (3)에 대입하면 액체의 밀도를 알 수 있다. 계산 결과는 Table 1에 나타내었으며 이 결과로부터 액체의 밀도가 증가하면 공진주파수는 단조감소(monotonically decreased)함으로써 실험결과와 유기용매 표준밀도값의 변화양상은 일치한다는 것을 알 수 있었으며 오차범위는 4.6~9.0%수준으로서 비교적 높은 것으로 나타났다.

이러한 오차발생의 원인은 첫째, 액체에 담가진 튜닝포크의 진폭변화도가 평균 ±20Hz 내외로서 진공에서의 ±0.1Hz 보다 훨씬 크기 때문인데 이는 액체의 밀도변화 20kg/m³에 해당한다. PZT 구동전압을 증가시키면 이러한 부분이 다소 개선되지만 근본적인 해결책은 아니다.

둘째, 계산에 사용하기 위해 도입한 모델이 완전하지 않기 때문이다. 예를 들어 튜닝포크에서는 두 개의 다리가 동시에 움직이지만 같은 방향 내에서 진동하기 때문에 여기에서는 상호간의 영향을 무시하였다.

셋째, 액체의 점성이 가지는 영향을 무시하였기 때문이다. 식 (2)의 둘째 항은 셋째 항이 가지는 영향력의 1% 정도만 효과를 발휘하므로 액체의 점성은 밀도에 매우 작은 영향을 준다고 가정하였다. 그러나 이러한 가정은 액체의 점성이 1 x 10⁻³kgm⁻¹s⁻¹ 이하에 있을 때에만 유효하다. 하지만 점도가 비교적 높은 에탄올 등의 액체점성은 20 x 10⁻³kgm⁻¹s⁻¹ 정도이므로 이러한 가정은 오차를 발생시키게 된다.

넷째, 실험조건에서 설명한 바와 같이 실험시 주위 온도가 약 26~27°C 범위로서 비교적 높았기 때문이다. 즉 실험에 영향을 주는 소음과 진동을 최대한 배제하기 위하여 공기의 유동이 없고 조용하며 밀폐된 곳에서 실험을 함으로써 PC, 계측장비, 조명 등의 발열에 의해 실내온도가 상승하면서 기준시료의 밀도가 변화하여 계측오차가 커진 것으로 판단된다. 참고로 기준시료의 표준밀도는 20°C에서 측정된 값이다.

다섯째, 본 실험에 사용한 제어회로는 몇 가지의 기본전자 부품들만으로 이루어진 단순한 회로로서 주변으로부터 유입

되는 잡음신호와 온도 등의 영향 등을 배제할 수 없으므로 상업용 고급계측기와 달리 비교적 큰 오차가 발생한 것으로 사료된다.

5. 결론

튜닝포크를 이용한 액체밀도 계측기의 타당성을 알아보기 위한 실험이 이루어졌다. 캔탈레버에 대한 해석이론을 바탕으로 서로 다른 액체 속에서 튜닝포크의 공진주파수를 측정하고 이를 이용하여 액체의 밀도를 계산한 후 핸드북상의 기준값과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험결과 기준시료의 밀도값이 증가함에 따라서 튜닝포크의 공진주파수가 단조감소(monotonically decreased) 함으로써 기준시료의 표준밀도값과 튜닝포크로 계측한 밀도값의 변화양상이 일치하는 경향을 보였다.
- (2) 계측오차범위는 4.6~9.0% 정도로서 다소 높은 편이었다. 이러한 오차발생의 원인은 액체 속에서 튜닝포크의 진폭변화도 증가로 인한 정확도감소, 계산식을 유도하기 위해 도입한 해석모델의 불완전성, 액체 점성의 영향을 무시한 점, 실험공간의 높은 주위온도로 인한 기준시료의 밀도변화, 그리고 정확도가 떨어지는 단순한 제어회로의 채용 등이 복합적으로 작용하여 나타난 것으로 보인다. 따라서 제어회로의 성능을 향상시키고 액체점성의 영향을 고려하는 등 모델링기법을 보완한다면 계측오차를 현재의 1/10 이내로 줄임으로써 계측성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 튜닝포크는 다른 초정밀 계측장비와 달리 소비전력이 매우 낮아서 소형으로 만들기에 적합하며 Q-factor값이 상대적으로 우수한 계측소자이다. 본 실험을 통하여 튜닝포크를 이용한 액체밀도 계측기는 일관성 있는 계측성능을 보임으로써 계측기로서 사용될 수 있는 가능성을 입증하였다고 판단된다.

- (4) 이상과 같은 결론을 종합해 보면 상용 튜닝포크를 계측 소자로 활용하고 보완된 해석기법과 제어회로를 채택한다면 요구되는 계측성능을 보유한 휴대용 액체밀도 계측기를 저렴한 비용으로 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Guan, S., 2003, "Frequency encoding of resonant mass sensors for chemical vapor detection," *Anal Chem*, Vol. 75, pp. 4551~4557.
- (2) Kim, C. H. and Ahn, H. S., 2005, "Frequency characteristics of micro-cantilever sensor using tuning fork," *Transaction of KSMTE*, Vol. 14, No. 5, pp. 35~40.
- (3) Sorab, J., Allen, R. H. and Gonik, B., 1988, "Tactile sensory monitoring of clinician-applied forces during delivery of newborns," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 35, No. 12, pp. 1090~1098.
- (4) Ito, H. and Nakazawa, M., 1988, "Analysis of pressure sensitivity of a tuning fork type quartz vacuum guage," *Trans. ICECE J. Series A*, Vol. 71, pp. 1069~1075.
- (5) Shih, W. Y., Li, X., Gu, H., Shih, W. and Aksay, I. A., 2001, "Simultaneous liquid viscosity and density determination with piezoelectric unimorph cantilevers," *J. Appl. Phys.*, Vol. 89, pp. 1497~1503.
- (6) Inaba, S., Akaishi, K., Mori, T. and Hane, K., 1993, "Analysis of the resonance characteristics of a cantilever vibrated photothermally in a liquid," *Appl. Phys.*, Vol. 73, pp. 2654~2660.
- (7) Bergaud, C. and Nicu, L., 2000, "Viscosity measurements based on experimental investigations of composite cantilever beam eigenfrequencies in viscous media," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 71, pp. 2487~2496.
- (8) O'Shea, S. J. and Welland, M. E., 1998, "Atomic force microscopy at solid-liquid interface," *Langmuir*, Vol. 14, pp. 4186~4192.